

На правах рукописи

Майрыгина Екатерина Александровна

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫХ  
ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Фролов Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Демидович Виктор Болеславович  
кандидат технических наук, ст. научный сотрудник  
Скорняков Владимир Анатольевич

Ведущая организация: ФГУП «ВНИИТВЧ им. В.П. Вологодина»

Защита состоится «01» марта 2012 г., в 18 часов на заседании диссертационного совета Д.212.229.20 при ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Гл. здание, аудитория 150.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «СПбГПУ». Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, СПбГПУ, отдел аспирантуры и докторантуры.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.212.229.20  
к.т.н., доцент

Курмашев А.Д.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Плазменное напыление является одним из наиболее эффективных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на поверхности деталей. Технологии плазменного напыления успешно применяются для создания защитных покрытий различного класса на вновь изготавливаемых деталях и для восстановления изношенных изделий. Воздушно-плазменное напыление, осуществляемое при атмосферном давлении, позволяет наносить покрытия даже из достаточно легкоокисляемых металлов.

Исследованию процесса напыления и изучению свойств газотермических покрытий, в частности, плазменных, посвящены работы многих ученых, как отечественных, так и зарубежных: В.С. Клубника, М.Ф. Жукова, В.В. Кудинова, В.Я. Фролова, О.П. Солоненко, П. Фоше, Э. Пфендера и др.

Для упрочнения и восстановления деталей требуются чаще всего износостойкие покрытия: необходимы высокие показатели твердости, адгезионной прочности и плотности покрытия.

Покрытия из самофлюсующихся сплавов на никелевой основе (ПГ-СР, СНГН, ПГ-12Н-01, ВСНГН) характеризуются износостойкостью в 5,5 раз выше, чем у закаленной стали 45. В зависимости от марки самофлюсующегося порошка твердость изменяется в пределах 35-62 HRC.

Однако покрытие, полученное в результате напыления, по своей структуре является в значительной степени пористым. В некоторых случаях это свойство можно использовать. Тем не менее, в большинстве случаев, в том числе для упрочнения детали и повышения износостойкости, требуются плотные покрытия с низким содержанием пор.

Другим важным недостатком плазменных покрытий является их относительно невысокая адгезионная прочность.

Существует несколько способов последующей обработки детали и повышения качества покрытия: пропитка покрытий специальными составами, окрашивание, поверхностное оплавление, ультразвуковое упрочнение, лазерная обработка.

На данный момент ни один из перечисленных методов не позволяет решить проблему повышения эксплуатационных характеристик покрытия.

В данной работе предложен метод повышения эксплуатационных свойств самофлюсующихся покрытий путем высокочастотной индукционной обработки.

Исследованию индукционного нагрева и разработке технологий термической обработки посвящены работы В.П.Вологодина, Е.Нортрупа, Г.И.Бабата, М.Г.Лозинского, Н.М.Родигина, А.Е. Слухоцкого, В.Н. Иванова, А.А.Фогеля, Г.А.Разорёнова, К.З.Шепеляковского, А.В.Донского.

В данной работе рассматривается применение скоростного индукционного нагрева для оплавления зоны на границе покрытия и подложки, что позволит существенно повысить сцепление покрытия с деталью, увеличить износостойкость покрытия путем сокращения пористости и остаточных напряжений.

Существенными преимуществами индукционного нагрева являются возможность оплавления узкой зоны сцепления покрытия и подложки, ввиду существенного расхождения их удельных сопротивлений, без значительного разогрева самой детали, и повышение КПД и производительности процесса по сравнению с другими методами обработки покрытий.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является повышение износостойкости плазменных покрытий методом индукционной термообработки путем выбора режимов работы технологического оборудования, обеспечивающих оплавление металла в зоне раздела сред покрытие-деталь.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

1. Разработка методики расчета индукционной термообработки деталей с плазменными покрытиями на основе двухимпедансной модели.
2. Разработка методики проведения экспериментальных исследований на основе физического моделирования параметров установки индукционного нагрева и детали.

3. Установление взаимосвязей между параметрами установки индукционного нагрева и характеристикам гетерогенной структуры покрытий на примере самофлюсующихся материалов.

**Методы исследований.** Исследования режимов индукционного нагрева изделия с покрытием проводились методами вычислительной математики (математического моделирования) и экспериментального исследования на основе физической модели. Разработанный метод математического моделирования базировался на основе метода контрольного объема, представляющего собой частный случай метода конечных элементов, а также при помощи лицензионного программного обеспечения Comsol Multiphysics, расчет в котором также осуществлялся на основе метода конечных элементов. Экспериментальные исследования проводились на стандартных промышленных установках для индукционной закалки. Анализ структуры покрытий производился путем исследования шлифов методом металлографии.

**Достоверность результатов работы** подтверждается сравнением результатов расчета с экспериментальными данными, комплексным исследованием характеристик покрытий и реализацией предложенной технологии.

Для расчета процесса нагрева детали с покрытием гетерогенной структуры использовалась лицензированное программное обеспечение Comsol Multiphysics 3.5.

Для анализа полученных результатов использовалось лицензионное оборудование: микроскоп Zeiss Optio с программой компьютерного анализа TIXOMET Pro, сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA с приставкой для рентгеновского микроанализа, электронный микроскоп НЕОРНОТ 32 с оптикой Carl Zeiss, система анализа «Виотест структура 5.2», Прибор определения микротвердости ПНТ-3 (Ломо), цифровые и аналоговые электроизмерительные приборы.

**Научная новизна.** Основные научные результаты, полученные впервые и защищаемые автором, заключаются в следующем:

1. Разработана электротехнология повышения эксплуатационных свойств плазменных самофлюсующихся покрытий с использованием метода индукционной термообработки.
2. Установлены режимы работы электротехнологического оборудования, позволяющие повысить адгезионные свойства покрытий в 2-5 раз и снизить их пористость с 22-24% до 6-9%.
3. Установлена теоретически и подтверждена экспериментально взаимосвязь параметров индукционной установки и свойств обрабатываемых деталей с плазменным покрытием.

**Практическая значимость работы.** Практическая ценность работы заключается:

- в разработки технологии метода ускоренного индукционного нагрева для повышения износостойкости напыляемых покрытий из самофлюсующихся материалов для упрочнения и восстановления деталей.

- в разработке методики расчета индукционного нагрева системы – плазменное покрытие – деталь и установлении требуемых режимов работы электротехнологического оборудования.

- в реализации метода физического моделирования при проведении экспериментальных исследований, что позволило сократить затраты на проведение экспериментов и увеличить количество опытов.

Данные, полученные в результате расчетов и экспериментальных исследований, позволяют рекомендовать применение в промышленном серийном и мелко-серийном производстве технологии ускоренной индукционной термообработки самофлюсующихся покрытий с целью повышения износостойкости деталей из различных материалов.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Методика расчета системы: индуктор – плазменное покрытие – основа, отличающейся неоднородностью нагреваемого материала.
2. Результаты сравнительного анализа параметров и режимов индукционного нагрева деталей с плазменным покрытием.

3. Закономерности взаимовлияющих параметров установки индукционного нагрева и свойств термически формируемого покрытия.

**Публикации по теме работы.** По результатам проведенных исследований опубликовано 7 работ, в том числе 3 – в издании, включенном в перечень ВАК.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов (Россия, Санкт-Петербург – XXXV неделя науки СПбГПУ, 2007; Россия, Санкт-Петербург – XXXVI неделя науки СПбГПУ, 2008, Россия, Санкт-Петербург – «Наука и инновации в технических университетах», 2008); девятой международной конференции «Пленки и покрытия – 2009» (Россия, Санкт-Петербург, 2009), одиннадцатой международной конференции «Пленки и покрытия – 2011» (Россия, Санкт-Петербург, 2011).

**Личный вклад автора:**

- Разработана математическая модель для расчета индукционной термообработки деталей с плазменными покрытиями.
- Разработана и изготовлена физическая масштабная модель, проведены экспериментальные исследования на основе физического моделирования параметров установки индукционного нагрева и детали.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 51 наименование. Полный объем диссертации – 135 страниц, в том числе рисунков – 45, таблиц – 17.

Во Введении показана актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, отражается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе описано состояние исследований в области упрочнения покрытий, произведен анализ существующих методов обработки покрытий, особенностей их применения и получаемых свойствах покрытий. Описаны опыты применения индукционной термообработки.

Выявлены специфические особенности нагрева деталей с покрытием с использованием токов высокой частоты (ТВЧ), позволяющие высказать предположение о возможных преимуществах его использования для обработки покрытий.

Во второй главе приведен расчет индукционной системы, представлены обоснования выбора конструкции индуктора для частного случая обработки цилиндрической поверхности. Проводится теоретический анализ процессов, происходящих при индукционном нагреве заготовки с покрытием.

В третьей главе излагаются методики проведения экспериментальных исследований повышения эксплуатационных свойств покрытий с помощью индукционной термообработки. Приведены результаты металлографического исследования образцов.

Заключение отражает обобщенные выводы и рекомендации по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

## **Основные защищаемые положения**

### **1. Методика расчета системы: индуктор – плазменное покрытие – основа, отличающейся неоднородностью нагреваемого материала.**

Теоретический анализ производится при помощи математического моделирования индукционной системы индуктор-покрытие-деталь с использованием метода контрольного объема и метода конечных элементов (Comsol Multiphysics 3.5).

Рассматривается случай напыления и последующей обработки цилиндрических деталей, в частности, случай нанесения износостойкого покрытия на посадочные поверхности валов под подшипники. В этом случае требуется напылить и провести термообработку участка цилиндрической поверхности вала. Используется метод одновременного нагрева системы покрытие - основа, выбор индуктора осуществляется под заданную ширину обрабатываемого участка.

Для расчета геометрии индуктора используется схема замещения подобная схеме замещения трансформатора. Используя полученные в



результате расчета геометрические и электрические параметры индукционной системы, было произведено математическое моделирование процесса нагрева.

Для исследования процесса индукционного нагрева двухслойной среды с помощью математического моделирования были использованы численные методы решения электромагнитной и тепловой задач, основанные в частности на методе контрольного объема. Совокупность уравнений электромагнитного поля и двумерного уравнения баланса энергии с начальными и граничными условиями позволяет получить распределения параметров, характеризующих индукционную установку и процессы, происходящие внутри нагреваемой детали.

Уравнение электромагнитной задачи решается для расчетной области, включающей заготовку с покрытием и пространство внутри индуктора, а также пространство вокруг индукционной системы:

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (1)$$

Двумерное уравнение баланса энергии (УБЭ) является основным уравнением описания теплообменных процессов при нагреве заготовки с покрытием, объединяя все основополагающие составляющие теплообмена (2):

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} T) = S_T - \text{div}\left(-\frac{\lambda}{c_p} \cdot \text{grad} T\right) \quad (2)$$

где  $S_T$  – источниковый член:

$$S_T = \frac{1}{c_p} \cdot \left( \frac{j^2}{\sigma} - U_{rad} \right) \quad (3)$$

Уравнение баланса энергии решается для объема заготовки с покрытием.

Модель имеет следующие допущения: индуктор рассматривается как несколько круговых витков, плоскость которых перпендикулярна оси индуктора; по виткам индуктора протекает синусоидальный ток; в проводящем цилиндре и в индукторе ток переноса равен нулю; токи во всех витках индуктора одинаковые, имеют нулевую фазу.

Система нелинейных дифференциальных уравнений решается методом контрольного объема. Результатами расчета являются распределения различных величин в расчетной области в процессе нагрева: температуры, электрического и магнитного полей, плотности электрического тока.

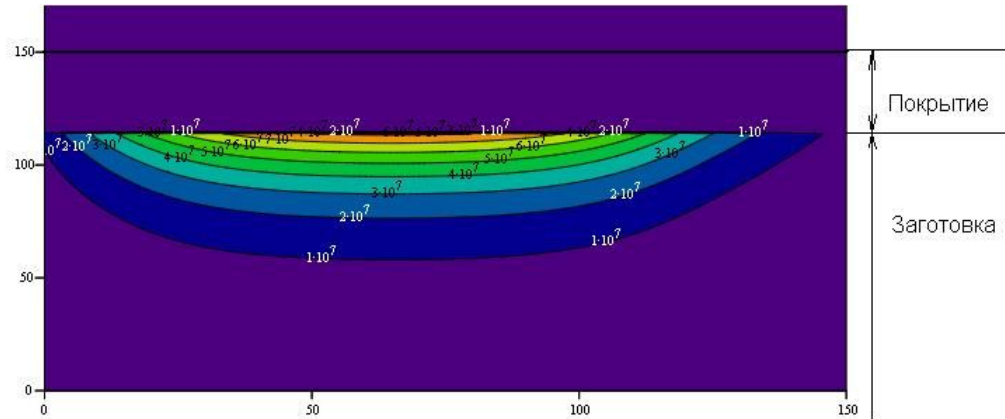


Рис. 1. Расчетное распределение плотности тока в заготовке

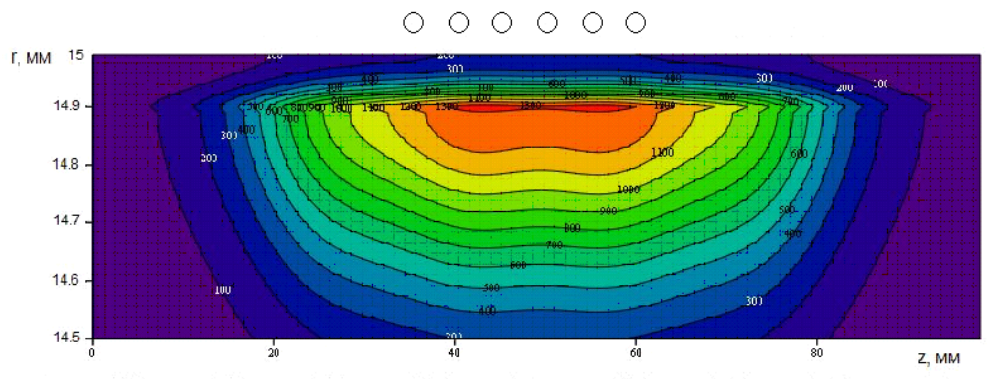


Рис. 2. Расчетное распределение температуры в заготовке

На рис. 1 и 2 приведены распределения плотности тока и температуры в заготовке с покрытием, полученные для следующих исходных данных: начальная температура заготовки – 20°C, материал – нержавеющая сталь 08X18H10T X6CrNiTi18-10; материал покрытия – ПГСП2 (Ni-Cr-B-Si), толщина – 100 мкм, частота – 66 кГц.

Помимо математического моделирования методом контрольного объема был произведен расчет с помощью лицензированного программного обеспечения Comsol Multiphysics 3.5. В отличие от моделирования методом контрольного объема, при решении задачи в программе Comsol Multiphysics 3.5, моделирование электромагнитных и тепловых процессов производится

для полной расчетной области, включая область внутри заготовки, область внутри индуктора, области внутри витков индуктора, пространство вокруг индукционной системы, что позволяет получить более полную картину термообработки.

На рис. 3 - 4 приведены полученные распределения плотности тока и температуры, иллюстрирующие оптимальный режим нагрева заготовки из нержавеющей стали 08X18H10T с покрытием ПГСР2 толщиной 100 мкм с частотой 66кГц, время нагрева – 0,1сек.

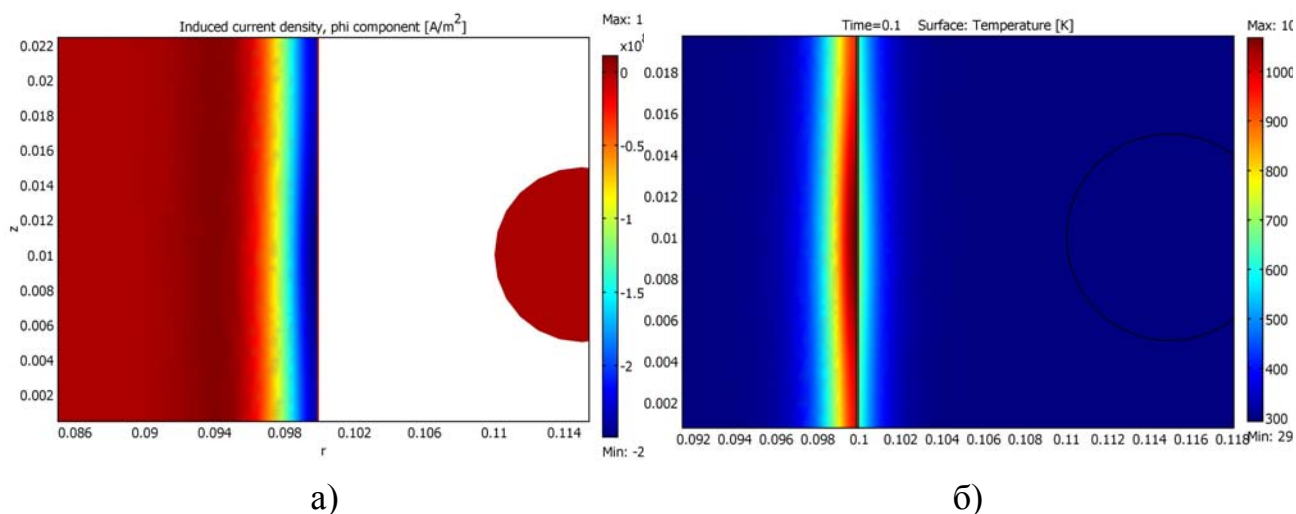


Рис. 3. Распределение а) плотности тока в заготовке б) температуры в заготовке

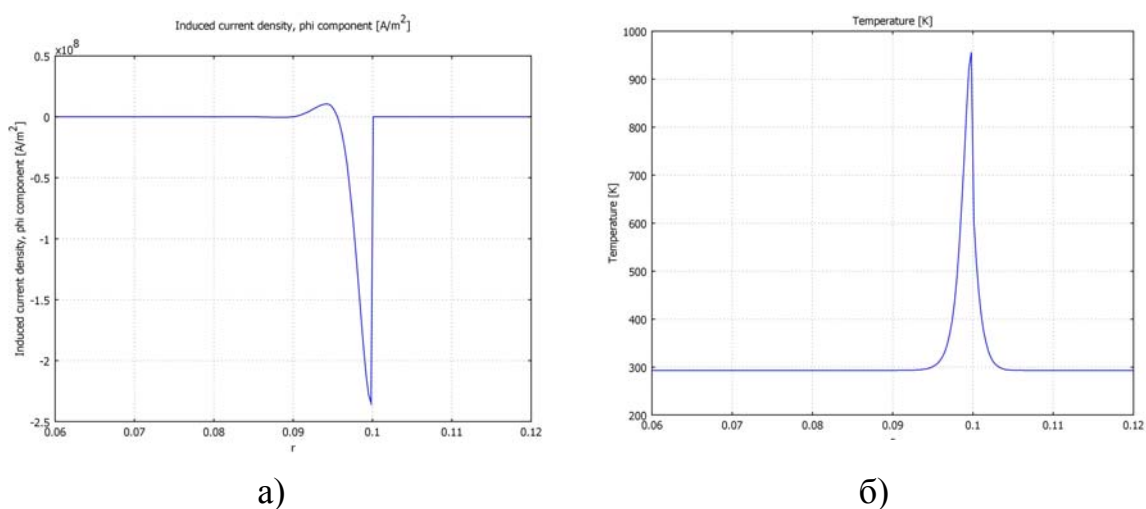


Рис. 4. Радиальное распределение внутри заготовки а) плотности тока б) температуры

В результате математического моделирования была определена полоса частот 50кГц – 1,76МГц, применимых для индукционной обработки заготовок с покрытиями. При использовании частоты ниже 50кГц происходит сильный нагрев заготовки в связи с большой глубиной проникновения. При увеличении частоты выше 1,76МГц нагрев становится нецелесообразным из-за сильного разогрева поверхности детали и большого рассеяния тепла в связи с малой глубиной проникновения тока. Установлена взаимосвязь между геометрическими параметрами индуктора и получаемыми режимами нагрева.

## **2. Результаты сравнительного анализа параметров и режимов индукционного нагрева деталей с плазменным покрытием. Закономерности взаимовлияющих параметров установки индукционного нагрева и свойств термически формируемого покрытия.**

На основании результатов математического моделирования были выбраны режимы нагрева, реализованные при проведении экспериментальных исследований.

Нагрев заготовки с покрытием является достаточно сложным объектом для экспериментальных исследований. Сложность проведения измерений основных параметров процесса связана с проблематичностью измерения температуры нагрева и плотности электрического тока внутри нагреваемых слоев детали. Практически можно оценить только температуру на поверхности детали и с торца заготовки, а также интегральные параметры электрической цепи индуктора.

Таким образом, основными задачами проведения экспериментальных исследований становятся:

- определение основных параметров нагрева детали, таких как температуры нагрева и времени нагрева, мощности передаваемой в индуктор от генератора, частоты генератора, тока индуктора
- исследование шлифов деталей после нагрева, оценка изменений структуры покрытий
- установление качественной и количественной связи между внешними и геометрическими параметрами используемого оборудования,

определяющими технологический процесс, и качеством получаемых покрытий.

Для экспериментального подтверждения теоретического анализа свойств покрытий в результате индукционной термообработки был произведен нагрев модели заготовки диаметром  $\varnothing 20$  мм (материал – сталь 08X18H10T) с покрытиями толщиной от 50 до 600 мкм, материалы покрытий – ПГСР2, ПГСР4, ПТЮ10). Нагрев был произведён во ВНИИТВЧ им. Вологодина с помощью высокочастотного генератора ВЧГ-60. Мощность использованной установки 60 кВт, частота 66 кГц. Параметры индукционной установки: Внутренний диаметр индуктора по меди 24 мм, длина индуктора 10 мм, число витков индуктора -1, размер витка индуктора в радиальном направлении – 10 мм.

Нагрев изделий производился на разных режимах в зависимости от мощности колебательного контура генератора – 5 кВт, 11.5 кВт и 36.8 кВт.

Для анализа полученных результатов методом металлографии использовались следующие оборудование: микроскоп Zeiss Optio с программой компьютерного анализа TIXOMET Pro, сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA с приставкой для рентгеновского микроанализа, электронный микроскоп НЕОРНОТ 32 с оптикой Carl Zeiss, система анализа «Виотест структура 5.2». Система «Виотест структура 5.2» позволяет определить количество, объем и характеристики пор и рассчитать параметры пористости покрытия. Определение адгезии производилось методом технологической пробы (ударным нагружением). Для определения микротвердости использовался прибор ПНТ-3 (Ломо).

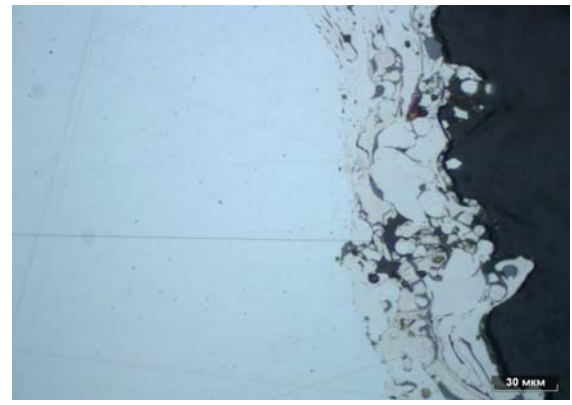
В разделе анализ экспериментальных данных приведены снимки шлифов обработанных заготовок.

Шлифы сделаны на кафедрах «Пластических деформаций» и «Обработки металлов» СПбГПУ. Анализ свойств покрытий приводился на основе исследования пористости и микротвердости покрытий.

На Рис. 5-7 показаны наиболее характерные поперечные шлифы образцов до термообработки и после индукционной обработки при мощности колебательного контура 36.8 кВт.



а)

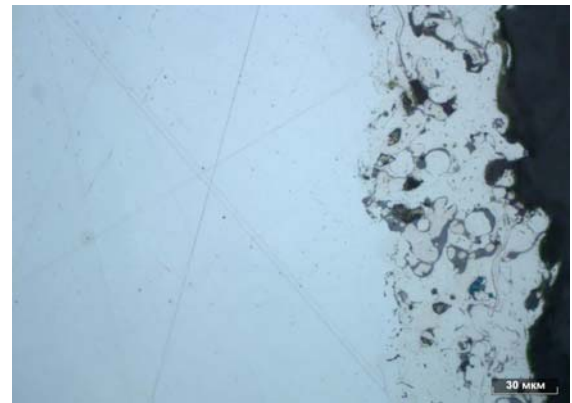


б)

Рис.5. Поперечный шлиф образца до термообработки. Масштаб а) 1:100 б) 1:1000



а)

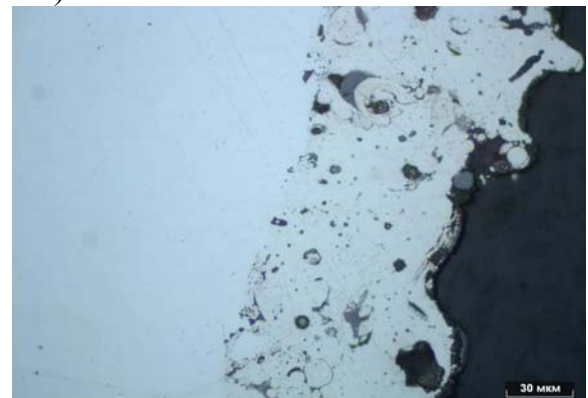


б)

Рис.6. Поперечный шлиф образца после индукционной термообработки при мощности колебательного контура в 11,5 кВт. Масштаб а) 1:100 б) 1:1000



а)



б)

Рис.7. Поперечный шлиф образца после индукционной термообработки при мощности колебательного контура в 36,8 кВт. Масштаб а) 1:100 б) 1:1000

Металлографическое исследование шлифов позволяет сделать вывод об уменьшении пористости покрытий с увеличением мощности нагрева. После индукционной обработки количество пор уменьшилось с 22-24% (до термообработки) до 6-9% (при максимальной мощности нагрева). Твердость покрытий данных образцов увеличилась с 42 до 60-65 (HRC).

Испытания на адгезию показали увеличение прочности сцепления покрытия с подложкой в несколько раз относительно необработанных образцов: прочность сцепления покрытий до термообработки составляла от 1,0 до 1,7 кг/мм<sup>2</sup>, после термообработки деталей при максимальной мощности нагрева – от 2,5 до 11,0 кг/мм<sup>2</sup>.

### **Заключение**

Основные научные и практические выводы заключаются в следующем:

1. На основе проведенного критического анализа литературных источников выявлено современное состояние проблем обработки покрытий нанесенных методом плазменного напыления, определены пути решения актуальных задач обработки покрытий, сформулированы задачи диссертации.
2. Предложен метод индукционной термообработки самофлюсующихся покрытий.
3. Разработана методика расчета процесса индукционной термообработки.
4. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование физических характеристик плазменных покрытий. Получены характеристики для напыленных покрытий из материала ПГСР2.
5. В результате математического моделирования получены распределения электрического и магнитного полей, плотности электрического тока, температурного поля в нагреваемой заготовке с покрытием.
6. Проведено экспериментальное исследование нагрева заготовке в индукционной установке частотой 66кГц.

7. Получены снимки шлифов деталей после обработки, произведен анализ свойств покрытий на основе исследования пористости и микротвердости покрытий.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### *Публикации в изданиях рекомендованных перечнем ВАК России*

1. Методика проведения экспериментальных исследований индукционного нагрева деталей с покрытиями Е.А. Смирнова, Б.А. Юшин // Научно-технические ведомости СПбГПУ №4 (135)- 2011.– с. 248-252.
2. Методы обработки самофлюсующихся покрытий. Индукционное оплавление Е.А. Смирнова // Научно-технические ведомости СПбГПУ №4 (135)- 2011.– с. 258-262.
3. Применение ускоренного индукционного нагрева для повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий Фролов В.Я., Смирнова Е.А., Юшин Б.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ №4 (110)- 2010.– с. 187-192.

#### *Публикации в других изданиях:*

4. Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий методом индукционной термообработки Фролов В.Я., Смирнова Е.А., Юшин Б.А. // Металлообработка, 2009.-№2 (50)-с.28-34.
5. Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий методом индукционной термообработки Фролов В.Я., Смирнова Е.А., Юшин Б.А. // Сборник трудов всероссийской научной конференции «Пленки и Покрытия»/СПбГТУ – СПб, 2009.
6. Улучшение качества покрытий методом индукционного нагрева/ Фролов В.Я., Смирнова Е.А.// Сборник трудов всероссийского форума «Наука и инновации в технических университетах»/ СПбГТУ – СПб, 2009.
7. Улучшение качества покрытий методом индукционного нагрева/ Смирнова Е.А.// Сборник трудов конференции «XXXVI неделя науки СПбГПУ», 2008.